

大型机械设备的智能故障诊断与预测性维护技术

赵希富, 靳育树, 石来发, 丁瑞军, 胡埔熠
石河子工程职业技术学院, 新疆 石河子 832000

摘要: 伴随着工业4.0时代的来临, 大型机器装备的重要性日益凸显。由于其复杂度高、价格昂贵, 因此, 一旦发生失效, 将会造成巨大的经济损失与安全隐患。常规的设备故障诊断与维修方法主要依靠常规的设备维修或维修, 效率低下, 费用高, 容易出现漏检现象。通过将物联网、大数据分析、人工智能等前沿技术相融合, 可以实时监测装备的运行状况、早期故障预警、优化维修策略, 提升装备的可靠性和生产率。为了提高装备的可靠性, 减少维修费用, 采用智能化的故障诊断和预测性维护方法是十分必要的。本课题以大型机械装备为研究对象, 对其进行智能化故障诊断与预测性维护, 并结合实例进行实证研究。

关键词: 大型机械设备; 智能故障诊断; 预测性维护; 数据分析

Intelligent Fault Diagnosis and Predictive Maintenance Technology for Large Mechanical Equipment

Zhao Xifu, Jin Yushu, Shi Laifa, Ding Ruijun, Hu Yongyi
Shihezi Engineering Technical College, Shihezi, Xinjiang 832000

Abstract: With the advent of Industry 4.0 era, the importance of large machinery and equipment has become increasingly prominent. Because of its high complexity and high price, once failure occurs, it will cause huge economic losses and security risks. Conventional equipment fault diagnosis and maintenance methods mainly rely on conventional equipment maintenance or maintenance, low efficiency, high cost, easy to appear missing detection phenomenon. Through the integration of cutting-edge technologies such as the Internet of Things, big data analysis, and artificial intelligence, it is possible to monitor the operating status of equipment in real time, early fault warning, optimize maintenance strategies, and improve the reliability and productivity of equipment. In order to improve the reliability of equipment and reduce maintenance costs, it is necessary to adopt intelligent fault diagnosis and predictive maintenance methods. This topic takes large machinery and equipment as the research object, carries on intelligent fault diagnosis and predictive maintenance, and carries on empirical research with examples.

Keywords: large machinery and equipment; intelligent fault diagnosis; predictive maintenance; data analysis

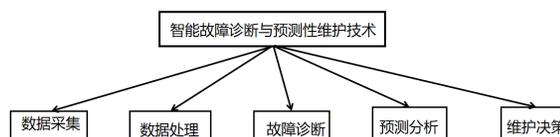
引言

大型机械设备, 如重型机床、发电设备、矿山机械等, 是现代工业生产的核心。其工作状况的好坏, 直接关系到企业的生产效率及产品质量。由于其设备复杂、工作环境多变, 很难避免发生故障。传统的故障诊断与维修手段主要依靠人工经验与周期性维修, 效率低, 且无法对其进行精确的预测与防范。为此, 提出了一种智能化的故障诊断和预测性维护方法^[1-3]。

一、技术框架

智能故障诊断与预测性维护技术的核心框架包括数据采集、数据处理、故障诊断、预测分析和维护决策五个主要环节(如图1所示)。

数据收集: 该部分采用先进的传感技术及物联网设备, 可实时、准确地获取各种工业装备的操作信息。振动频率、温度、压力等参数包含了装备的振动频率、温度、压力等重要参数, 是掌



> 图1 智能故障诊断与预测性维护技术框架

握装备健康状况、及时检测故障的重要依据。传感器及物联网终

端的高精度、实时性，保证了数据获取的准确、及时，为后续分析打下了良好的基础。

资料整理：包含资料清理，剔除重复的，错误的，不相干的资料，以保证资料的正确与一致；资料去噪，采用过滤等方法降低资料中的噪音，改善资料的信噪比；神经网络的故障诊断方法。进一步提高了数据的质量，为下一步的研究提供了更可靠、更有效的数据支撑。

以机器学习，深度学习等先进算法为基础，对装备数据进行深度挖掘，是故障诊断的核心。该方法可以对数据中存在的异常模式进行自动辨识，并将其与已有的失效模式相匹配，进而精确地判断出设备的异常状况及故障种类。在此基础上，提出了一种基于神经网络的故障诊断新方法。

预测分析部分：通过对生产过程中的历史与实际资料进行全面的分析，对生产过程中所蕴含的信息进行深入的挖掘。基于神经网络的多目标优化设计方法，实现对装备剩余寿命、失效概率和失效时间的精确预测。该预报功能可以为维修人员提前进行维修工作，使维修人员可以在事故发生之前就进行防范，以防止或降低因事故造成的损失^[4]。

维护决策：维修决策阶段的首要工作就是在维修决策过程中，通过对维修方案的分析，确定最佳维修方案。这一步要从设备的实际情况，维修费用，生产要求等方面进行综合分析，确定一套符合成本效益的维修计划。提出一种新的维修方法，并对其进行了改进。多源异构信息融合的智能制造系统，通过对多源异构数据的分析的新方法。

二、关键技术

（一）数据采集与传输

传感器技术：高精度传感器是现代工业和智能化监控体系中必不可少的一环。其中，振动、温度等传感器在各种机器设备中得到了广泛的应用。振动传感器是一种能准确获取装备运行过程中振动幅值、频率、相位等重要物理量，对装备运行状态进行准确评价和预警具有重要意义。采用温度传感器对其工作温度进行实时监控，以保证其在合适的工作环境中工作，防止因过热、过冷而造成的性能退化和损伤。高精度传感器的使用为设备监控提供了有力的保障。

物联网（IoT）：随着物联网技术的发展，设备监控向智能化、高效率方向发展。各种类型的传感器通过无线网络将所收集到的数据实时地上传到云服务器或者边缘计算设备上。云计算具有高效的数据处理与存储功能，可实现对海量数据的深层次分析与长时存储，为故障诊断、预测分析及维修决策等提供强有力的支撑。而边缘计算作为数据源，可以快速地对数据进行处理与分析，降低数据传输时延，提升系统的实时性。随着物联网技术的发展，不仅可以实现数据的实时传递与存储，而且可以更大范围地利用和共享，给设备的智能管理与维护提供了空前的方便^[5]。

（二）数据处理与特征提取

数据清洗是一项重要的工作，它的主要目标就是剔除噪音和离群点，以提高数据质量。噪声一般是由于传感器误差、环境干扰等引起的随机误差，而离群点是由设备故障、人为失误或数据获取等引起的极值数据。通过对数据进行清理，以减少干扰，从而保证数据的准确、可靠。

特征抽取其目的在于从复杂的数据中提取出与设备运行状况

紧密相关的特征。其中，振动信号的频谱特性（如频谱分布、主频等）与时间特性（均值、方差、峰值等）的时间特性是一个重要的研究课题。频谱特性可以反映出装备的振动特性，对诊断装备故障的种类、程度有很大的帮助；同时，时域特征量可以反映设备在时域内的振动信号的统计性质，对评价装备的工作状况具有重要的指导意义。本项目提出了一种新的研究思路，即将高维数据转换成低维向量，并对其进行更准确、更高效的描述。

降维是基于特征抽取对数据进行降维处理的一种方法。主元分析（PCA）是目前应用最广泛的方法之一。主成分分析法是对原数据进行线性转换，使其在新坐标系（也就是主分量）上的变化达到最大，这样才能最大程度地保持数据的主要信息。该方法首先选取最重要的主元作为新的特征矢量，从而有效地缩减了数据维数，并降低了对内存的要求。高维数据的高维数据降维方法，它可以有效地解决高维数据的学习问题，并有效地改善了算法的泛化性能^[6]。

（三）故障诊断算法

机器学习是一种极具应用前景的设备状态监控和故障诊断方法。利用SVM、随机森林等方法，建立了一种基于机器学习的设备状态识别方法。支撑向量机是一种能从高维空间中找到最佳超平面的方法，它能有效地识别各种类型的数据，尤其适合于小样本、高维数据的情形。而随机森林技术通过构造多棵树，融合多棵树的输出，可以处理复杂的非线性关系，避免过度学习，从而提升分类精度和稳健性。该方法的成功实施，实现了对设备运行状态的自动辨识与分类，极大地提高了系统的运行效率与精度^[7]。

深度学习是一种新兴的机器学习方法，其在复杂故障识别中的应用已经取得了长足的发展。卷积神经网络（CNN）、循环神经网络（RNN）在特征抽取、模式识别等方面都有很好的应用前景。卷积神经网络利用卷积层、池化层等结构对图像或信号进行局部特征的自动抽取，尤其是对含有空间结构的信息，比如振动频谱。然而，循环神经网络可以有效地处理时序数据的时序相关性，适合对时序数据进行演化分析。本项目拟采用深度学习方法，实现对复杂故障的准确、有效识别，为智能化装备故障诊断开辟新思路。

专家系统是领域知识与规则库相结合的辅助诊断方法。专家系统能够综合考虑多种因素和设备的历史数据，为故障诊断提供全面的分析和建议。通过与机器学习或深度学习模型的结合，可以进一步提升诊断的准确性和可靠性，为设备维护决策提供有力的支持。这些技术的综合运用，推动了设备状态监测与故障诊断领域的智能化发展。

（四）预测性分析

在装备维修管理中，对装备的剩余寿命进行精确预测，是进行装备维修规划、预防故障发生的基础。为此，本项目拟利用时间序列分析、回归模型和深度神经网络等多种方法进行研究。时间序列的装备故障诊断方法。基于回归分析，即通过对装备运行状态和运行状态进行建模，从而实现对装备使用寿命的预测。近年来，由于深度学习具有较强的非线性拟合特性，在剩余寿命预测方面表现出极大的潜力。利用长时记忆网络、卷积神经网络等深度神经网络，从设备数据中挖掘出深层特征，实现设备剩余寿命的精确预测。研究成果可为装备维修管理工作提供可靠的数据支撑，对制定预防维修与最优维修策略具有重要意义。

故障预测：故障预报是装备维修管理中的又一重要内容，其目的是通过对装备运行过程中的各种状态信息进行分析，及时地

识别出可能出现的故障征兆，并对其进行及时、准确的判断。在此基础上，提出了一种基于数据挖掘，机器学习，深度学习的方法来进行故障预测。通过对装备数据的预处理、特征提取以及模型训练等手段，构建装备的故障预报模型，实现对装备工作状态的实时监控，并对可能出现的故障进行预测。该预报结果可用于应急计划的制定，缩短停机时间，减少维修费用。对提高企业的经济效益具有重要意义^[8]。

（五）维护决策优化

维护策略优化：在装备维修管理过程中，为了保证装备的高效、稳定运行，需要对维修策略进行优化。为维修方案的制定提供了依据。预防维修战略是指在设备失效前，对其进行常规的检测与维修，以预防可能出现的问题。而条件维修是指依据设备的实际工作状况与预测结果，对维修的时机与内容进行灵活的调整，以保证当设备的性能恶化或濒临失效时能够及时介入。将两种维修策略有机地结合起来，通过对设备运行历史、实时监控等信息的分析，得出最佳维修方案，使设备的使用寿命最大化，降低非正常停机次数，提升装备的可靠性与生产率。

资源调度：为了减少维修费用，减少维修费用，提高维修效率，对提高维修效率具有重要意义。资源调配包括维修人员、备品备件、工装等多种资源的调配与协调。通过对设备进行合理的资源调配，保证了维修人员的调配、维修、维修等工作的正常进行。同时，对设备维修要求进行预测，并预先计划好维修时间，从而减少维修时间的浪费与不足，从而提高维修效率。同时，也可以考虑运用物联网、大数据分析等现代信息技术手段，对资源进行智能管理与最优调度，进而减少维修费用，提高企业的竞争能力。在保证设备维修正常运行的前提下，对企业进行科学的资源调配，取得最大的经济效益^[9]。

三、应用案例

（一）风力发电机组的智能维护

风力发电机组通常运行在恶劣环境中，传统维护方式成本高且效率低。通过部署智能故障诊断与预测性维护系统，可以实现对风机叶片、齿轮箱等关键部件的实时监控和故障预警。例如，利用振动传感器采集齿轮箱的运行数据，通过深度学习模型识别早期故障，并结合预测分析优化维护计划。如图2。

（二）工程机械的预测性维护

在工程机械领域，智能故障诊断与预测性维护技术可以显著提高设备的可靠性和使用寿命。例如，在挖掘机中部署温度、压力和振动传感器，实时监测液压系统和发动机的运行状态，通过机器学习算法预测潜在故障，并提前安排维护。



图2 风力发电机组的智能维护

四、技术优势与挑战

优势：

提高设备可靠性：通过实时监控和早期预警，减少突发故障的发生。

降低维护成本：优化维护策略，减少不必要的定期检修。

延长设备寿命：通过预测性维护，延缓设备老化，延长使用寿命。

提高生产效率：减少停机时间，提高设备的运行效率。

挑战：

数据质量：传感器数据的噪声和缺失可能影响诊断和预测的准确性。

算法复杂性：深度学习模型的训练和优化需要大量的计算资源。

领域知识融合：如何将领域知识与 AI 算法有效结合，仍是研究的难点^[10]。

五、未来发展趋势

边缘计算：将数据处理和分析任务下沉至边缘设备，减少数据传输延迟。

数字孪生：通过构建设备的数字孪生模型，实现更精准的故障诊断和预测。

自适应学习：开发自适应学习算法，使系统能够根据设备运行状态动态调整模型参数。

六、结论

大型机械设备的智能故障诊断与预测性维护技术是工业智能化的重要方向。通过结合物联网、大数据分析和人工智能技术，可以实现对设备运行状态的实时监控、故障的早期预警以及维护策略的优化，从而显著提高设备的可靠性和生产效率。未来，随着技术的不断进步，智能故障诊断与预测性维护将在更多领域得到广泛应用。

参考文献

- [1] 郝军, 吴炜, 杨杨. 改进 D-S 算法在船舶汽轮机故障诊断中的应用研究 [J]. 航海工程, 2007, (03): 49-51.
- [2] 张晓东. 基于信息融合的船舶机电设备故障诊断 [J]. 船舶工程 2007 (3): 44-46.
- [3] 张化勋. 一种机械系统振动故障检测方法 [J]. 长春大学学报 2008 (3): 43-45.
- [4] 于海岳. 港口大型装卸机械设备运行状态智能监测技术探讨 [J]. 现代工业经济和信
息化, 2023, 13(04): 129-131.
- [5] 张寅, 李斌, 杨冬. 基于物联网技术的大型机械设备智能管理系统开发 [J]. 中国仪器仪表, 2023, (02): 53-58.
- [6] 彭文勇, 李娟娟, 郑梁, 等. 大型建筑施工起重机械设备智能管控系统应用研究 [J]. 山西建筑, 2023, 49(04): 183-186.
- [7] 程雪利, 刘刚. 大型机械设备分布式智能润滑控制系统研究 [J]. 河南工学院学报, 2021, 29(04): 1-4+9.
- [8] 王斌. 基于 WSNs 的大型机械设备远程监控系统设计 [J]. 机床与液压, 2021, 49(12): 87-92.
- [9] 林永森, 杨宁祥. 人工智能在大型桥门式起重机械运行监测中的应用 [J]. 特种设备安全技术, 2021, (02): 31-33.
- [10] 余智林. 大型机械设备振动系统故障诊断分析 [J]. 中国金属通报, 2019, (12): 68+70.